

胡 聿 贤 主 编

地震危险性分析中的
综合概率法

地 震 出 版 社



地震危险性分析中的 综合概率法

胡聿贤 主编

地震出版社

1990

内 容 提 要

本论文集着重介绍将我国地震长期预报经验与国际上通用的概率分析法相结合的综合概率法,在1987年取得的主要研究成果。核心是在地震危险性概率分析中如何考虑地震活动的时空不均匀特点。文章提出的不同的划分潜在震源区与确定地震活动性参数的原则和方法,反映了当前人们对地震活动认识的不确定性。本论文集对人们认识上的这种不确定性进行了综合分析,并对存在的问题及进一步需要研究的内容也作了阐述。

地震危险性分析中的综合概率法

胡聿贤 主编

责任编辑:陈焕新

责任校对:李和文

*

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 12印张 307千字

1990年3月第一版 1990年8月第一次印刷

印数 0001—1200

ISBN 7-5028-0247-9/P·159

(635) 定价: 6.60元

目 录

1. 地震危险性分析的综合概率法	胡聿贤 (1)
2. 潜在震源区划分的构造成因法 (华北地区)	环文林 常向东 黄玮琼 (9)
3. 时空不均匀性的地震活动性参数选取原则与方法	黄玮琼 环文林 常向东 (42)
4. 地震活动不均匀性的加权分析方法	常向东 环文林 黄玮琼 (58)
5. 潜在震源区的空间尺度及其边界确定的依据	汪良谋 (67)
6. 地震活动性参数的估计	董瑞树 冯荣梅 晋兴文 (76)
7. 预测震源参数和发震概率的构造物理方法探讨	王绳祖 (86)
8. 地震危险性区划中时空转换原则	高维明 (94)
9. 潜在震源区的图象识别与分类	张郢珍 栗生平 (112)
10. 华北平原北部和渤海地区潜在震源区划分及其地震活动参数的确定	汪良谋 董瑞树 王绳祖 徐 杰 冯荣梅 王湘南 (119)
11. 强震预测在地震危险性分析中的一些应用	张立人 (142)
12. 地震危险性分析中时空不均匀性的处理与应用——以华北地区为例	黄玮琼 常向东 环文林 (155)
13. 地震活动性估计的不确定性	胡聿贤 鹿 林 (176)

地震危险性分析的综合概率法

胡聿贤

(国家地震局地球物理研究所)

一、问题提出的背景

地震危险性研究可以说起自四十年代。当时,地震工程处于开始阶段,地震学家为满足生产需要而进行了地震烈度区划,给出一个大地区内未来可能发生的最高烈度分区图,以确定性的烈度为指标。区划所依据的原则是:历史上曾发生过的地震今后在同一地区内还可能发生,也可能在具有类似地震地质构造特性的其他地区发生。这一原则实际上相当于地震的发生在时间和空间上都是均匀的假定。1955年我国的第一张全国地震烈度区划图就是这样编制的。到六、七十年代,结构概率设计思想流行,以美国麻省理工学院土木工程系的科内尔教授为代表的土木工程师们,提出了地震危险性的概率分析方法,将原来的原则归纳为一个假定,即在一个地震区或带内,地震的发生在时间上或空间内是泊松事件,地震的大小比例则符合截头指数分布规律。在此基础上,他们提出了明确的分析步骤和计算方法,所得结果表示为某一场地的地震动超越概率曲线,用它来描述地震危险性。所谓超越概率曲线就是:在未来某一段时间内,地震动超过各给定数值的概率。有了这条曲线之后,工程师们可以根据自己的要求,选择某一超越概率的地震动值进行抗震设计。概率分析法沿用了地震活动在一个地震带内是时空均匀分布的假定,在此假定下,他们作出了下述三点贡献。第一,提出了一套简明而完整的步骤,使地震危险性估计规格化;第二,在地震动参数上,除地震烈度之外,还引入了地震动加速度,后来又推广到反应谱,更便于工程抗震设计;第三,最重要的是,给所估计的地震动以明确的定量的概率含义,因而常被称为地震危险性估计概率方法。此法在七八十年代已在世界范围内得到应用。其优点是简单,只需要根据历史地震资料确定泊松假定中的一个参数即年平均发生率,震级频率关系中的斜率 b 值和震级上限,以及地震动衰减规律,而且物理概念清楚;其缺点是尚未能考虑人们已经认识到的地震活动的时空不均匀性。

七十年代以来,我国地震工作有了很大发展,国家领导重视地震工作,成立了国家地震局,研究力量集中;另外,我国地震历史悠久,文献资料丰富,因此,通过一、二十年的研究工作,明确提出了地震活动在时间上是非平稳的,在空间上即使在一个地震区带之内也不是均匀的;并且在此技术思想下由国家地震局编出了我国第二张全国地震烈度区划图。此图以1973年以后的100年内可能发生的最大烈度为区划指标,它一直为我国工程界沿用至今。这张区划图的主要贡献是:结合我国具体情况,考虑了地震活动时空不均匀性,并提出了一套估计这种不均匀性的分析方法;其缺点是所提的可能最大烈度是确定性的,未能明确其概率含义以反映地震活动与预报的不确定性,用确定性的语言来表示具有不确定性的预测。

近十年来,我国生产建设蓬勃发展,设计和兴建了一批核电厂、海洋平台之类的重大特

殊工程，对它们都进行了地震危险性概率分析。国家地震局一方面抓紧重大工程的地震危险性分析，另一方面又在重新编制我国的地震区划图，以适应当前生产建设与经济发展的需要和当前国际地震工作的先进水平。为此，1987年在地震局内组成了地震区划编委会，几经讨论，又明确了新的地震区划图必须考虑我国地震活动的时空不均匀性，并要求用概率方法来表示地震的危险性，要求将我国地震长期预报经验与国际流行的概率法相结合。本文将按这一要求进行的地震危险性分析方法称为综合概率法。

二、综合研究的组织

在地质、地震、工程三者必须密切结合才能更好地解决工程地震问题的认识下，国家地震局组织了其下属的地球物理研究所、地质研究所、地震分析预报中心等三个位单的部分研究人员，共同开展综合概率法的研究，由笔者负责，要求提出一个可以为当前全国地震区划编图采用的地震危险性分析的综合概率法。由于全国区划图预定在三年内完成，第一年先在华北地区试点，确定方法，故综合概率法必须于一年内提出。这一要求决定了本研究是一个开发应用性质的研究。因此，我们遵循了以下五条原则：（1）立足于我国现有地震活动性认识的水平，客观地反映地震活动时空依赖关系；（2）在肯定地震活动随机特性的前提下，将地震长期预报与概率分析法密切结合起来；（3）充分承认现有认识的不完备性或不确定性，尊重专家意见，寻求这种不确定性的定量方法；（4）以当前区划编图的应用为主要目标，必须在一年内完成，长期的进一步研究另行安排；（5）只进行方法研究，不作具体地震区划。

由于上述原因，我们采用了下述技术步骤。第一，为了便于对比和应用，选择了资料较多的华北地区（东经 114° — 121° ，北纬 36° — 42° 范围）作为方法研究的对象，危险区划则在东经 116° — 119° 和北纬 38° — 40° 范围内。第二，由参加者提出自己的地震活动性估计方案，包括潜在震源区划分及地震危险性概率分析方法中所需要的地震活动性参数。由于目的仅在方法性研究，故不要求各人所提方案与所在单位的意见必须一致，而只要求各方案言之成理，有一定代表性，不必是大家公认的。第三，各方案进行交流对比，但不要求统一为一个方案，参与者可以自愿地修改自己的方案。因此，这些方案只是许多合理方案中的一部分，不必是区划编图组所拟采用的，目的在于用这些方案来反映我们当前的认识水平和差异，即认识上的不确定性，企图通过这样的研究来寻求潜在震源区如何划分、地震活动参数性如何确定、其中包含的不确定性大小和考虑方法。第四，采用蒙特卡罗法，在统一给定的地震烈度衰减规律下，分别计算出每一方案在东经 116° — 119° 、北纬 38° — 40° 区内每 $\frac{1}{4}^{\circ}$ 点上的地震危险性曲线。第五，对比研究所有方案的结果，寻求反映不确定性的地震危险性概率分析方法。

三、国际有关现状

地震发生具有时空不均匀性是大家公认的，地震区带的划分就是空间不均匀性的确认。但是，前面说的空间不均匀性主要是指在一个地震区带之内的空间。然而，当地震历史记录不够长（如美国）或地震重复期很长时，地震数据常觉太少，不足以了解一个地震区带内地

震活动性的时空差异，因而不得不采用在一个地震区带内和时间上地震活动是均匀的简单假定。随着时间的加长和认识的提高，人们从资料和理论上都认识到，在同一地震区带内地震活动性是有差异的，在时间上，地震活动的活跃期与平静期交替出现，与泊松假定不符，因而在广泛研究着如何在地震危险性分析中考虑时空不均匀性的地震活动性模型。

在地震发生时间的概率模式上，国际上应用过多种有记忆性的模式。如二态泊松模式，假设地震活动可以分为活跃期与平静期，它们可以分别用具有不同数值的模型参数，在各期内均可采用泊松模式的平稳假定；成丛模式则认为地震的发生是一丛一丛的，在一丛之内，地震具有主震余震关系，而这一丛地震与另一丛地震之间的关系则符合泊松模式；更新模型则将一次地震发生之后到下一次地震发生时的时段称为等待时间，此模式认为等待时间是决定下一次地震大小及可能性的重要参数，若等待时间与下一次地震无关即为泊松模式；但更新模式认为等待时间愈长则地震震级愈大。如库雷米坚提出的时间依赖模式认为等待时间与前次地震的大小有关，其滑移可测模式则认为等待时间与下次地震大小有关。半马尔可夫过程也曾被用来描述时间与震级的相关性。我国研究者也进行过类似的研究。

在地震活动的空间不均匀性上，国内外都认识到大地震多发生于一地震带内具有特定地质标志的地段，与较大较深的地质活动构造相联系。这一认识使得我们可以在一个地震带内再划分为多个不同震级上限的潜在震源区。

我国在这方面有重要的贡献，但都是用确定性方式描述的。我国研究者曾明确提出地震活动的规律可以分为应变积累、初始破裂、大释放、剩余释放四个阶段。前一阶段属平静期，后三个阶段属活跃期，合称为一个活动期。一个活动期可以长达几十至几百年，因地而异。板间地震的活动期较短，如我国台湾仅约三四十一年；板内地震的活动期较长，如华北地区约为三四百年。

四、本研究现阶段成果

本研究经过近一年（1987）的工作，所得主要成果汇编为本研究集，归纳起来，可分为以下五个方面。

1. 大地震发生的地质条件

本文集第二篇、第五篇重新系统地总结了我国地震地质工作者对地震活动时空不均匀性的认识，主要结果是：在一个地震带内，大地震多集中于带内具有特定地质标志的地段，震级愈大这些地段就愈集中，而中小地震则可能分散于全带之内。目前可以按震级大小粗略地分为三或四档，如 $5-6\frac{1}{2}$ ， $6\frac{1}{2}-7\frac{1}{2}$ （或 $6\frac{1}{2}-7$ ， $7-7\frac{1}{2}$ ）， $7\frac{1}{2}-8\frac{1}{2}$ 。这些结果来自我国历史地震经验的总结。由于历史地震记录丰富，有一定可靠性。按可靠性大小可以采取不同的权重。

2. 分段泊松模式

分段泊松模式假定在一地震带之内可以划分出具有不同震级上限的潜在震源区。在每一潜在震源区内，与之相应的震级段的地震活动符合泊松模式。在此潜在区内还可以发生更小震级段的地震，它们也在其较低的震级段内按另一泊松模式随机发生，参见本论文集第三篇文章。下面用图1所示的情况为例来说明这一假定。

设已确定一地震带的震级上限为 M_u ，选用的下限为 M_0 ，年平均发生率为 ν ，震级频度

关系可以用图 1 (b) 中的线段ad表示。整个地震带的面积为 $A = A'_1 = A_1 + A_2 + A_3$ ，震级分为三段，即 $M_0 - M_1$, $M_1 - M_2$, $M_2 - M_u$ 。 A_3 是具有此带中最高震级上限 M_u 的潜在震源区之和的面积，除此区之外，本带内其他地区不致发生大于震级为 M_2 的地震； A_2 是具有次高震级上限 M_2 的潜在震源区之和的面积，如图 1 (a) 中阴影面积所示。 A_3 与 A_2 各按其相应震

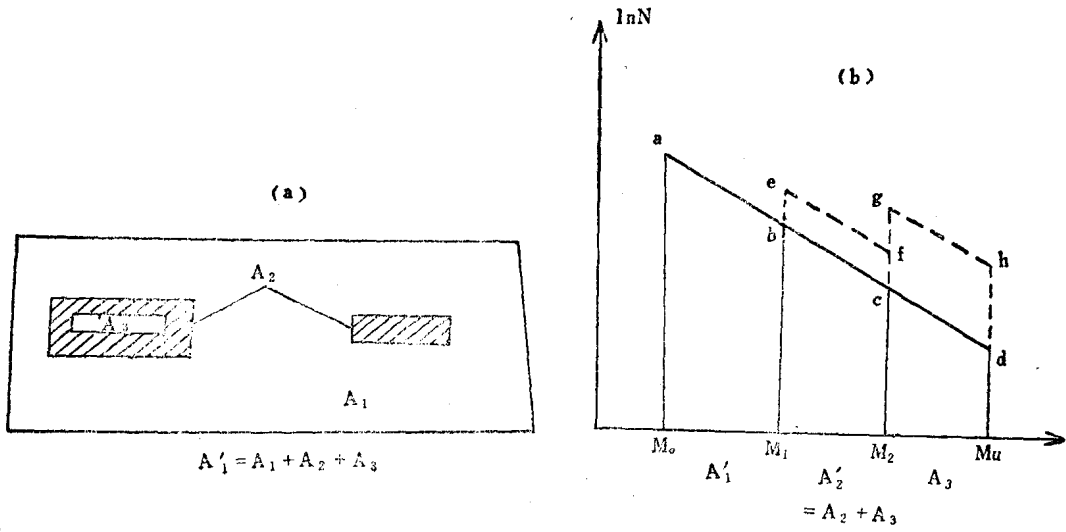


图 1 分段泊松模式的潜在震源区划分及震级频度关系

级上限的地质构造标志划分。带内除 A_3 与 A_2 区之外的地区则只可能产生不大于 M_1 的地震。与各区对应的活动性参数见表 1。表中各潜在区年平均发生率 $\nu^{(k)}$ ($j = 1, 2, 3$) 是考虑了地震活动空间不均匀性的震级分段的泊松假定后的值，它们与整个带内空间均匀假定下的年平均发生率 ν 的关系为

表1 震级分段的潜在震源区及其活动性参数

潜在震源区	面积和	震级上限	年平均发生率			图1(b)中所示 震级频度关系线段
			$M_0 - M_1$	$M_1 - M_2$	$M_2 - M_u$	
1	A_1	M_1	$\nu_1^{(1)}$	—	—	ab
2, 2'	A_2	M_2	$\nu_1^{(2)}$	$\nu_2^{(2)}$	—	ab, ef
3	A_3	$M_3 = M_u$	$\nu_1^{(3)}$	$\nu_2^{(3)}$	$\nu_3^{(3)}$	ab, ef, gh

$$\nu_j^{(k)} = \nu_j' A_k / (A_j')^2 \quad (j=1, 2, 3; k=j, j+1, \dots, 3) \quad (1)$$

式中 $A_j' = \sum_i A_i$, ν_j' 为全带内属于震级分段 i , 即 $M_{j-1} - M_i$ 这一部分的年平均发生率,

$$\nu = \sum_1^i \nu_i'$$

对于图 1 中的事例，某一场点的地震危险性计算可用下述公式：

$$\begin{aligned} \nu P[Y \geq y] &= \int_{A_1} \cdot \nu^{(1)} \int_{M_0}^{M_1} P[Y \geq y|m] f(m) dm dA \\ &+ \int_{A_2} \cdot \left(\nu^{(2)} \int_{M_0}^{M_1} + \nu^{(2)} \int_{M_1}^{M_2} \right) P[Y \geq y|m] f(m) dm dA \\ &+ \int_{A_3} \cdot \left(\nu^{(3)} \int_{M_0}^{M_1} + \nu^{(3)} \int_{M_1}^{M_2} + \nu^{(3)} \int_{M_2}^{M_n} \right) P[Y \geq y|m] f(m) dm dA \\ &= \int_{M_0}^{M_1} \left(\nu^{(1)} \int_{A_1} + \nu^{(2)} \int_{A_2} + \nu^{(3)} \int_{A_3} \right) P[Y \geq y|m] f(m) dm dA \\ &+ \int_{M_1}^{M_2} \nu^{(2)} \left(\int_{A_2} + \nu^{(3)} \int_{A_3} \right) P[Y \geq y|m] f(m) dm dA \\ &+ \nu^{(3)} \int_{M_2}^{M_n} \cdot \int_{A_3} P[Y \geq y|m] f(m) dm dA \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $P[Y \geq y]$ 为由于此地震带内未来可能发生的各种大小地震而在考虑场点产生大于给定值 y 的地震动 Y 的概率， $f(m)$ 是震级概率密度函数。上式明确表示出震级分段的泊松模式的含义。因为在任一震级分段内，都遵守泊松假定，计算公式亦与之相同，而在整个带内，由于经过公式 (1) 的修改，考虑到带内的大震级地震集中于较小的潜在震源区 A_2 或 A_3 之中，使得它不同于均匀分布的一般泊松模式。

3. 地震活动性参数的估计

地震发生的时间非平稳性在划分潜在震源区时已经有所考虑，但在估计地震活动性参数时反映得更为明确。初步研究表明，在平静期内，年平均发生率降低，震级上限较小（参见本文集第三篇和第六篇文章）。

目前，地震活动性参数主要是根据历史地震数据统计确定的。初步研究表明（本文集第三篇文章），地震活动性参数的统计单元以地震带为宜，所得结果稳定可靠；若统计单元再大，包括几个地震带，容易将性质不同的地质构造体系包括在一起；若统计单元再小，常由于数据太少而结果不稳定。总之，应以数据足够多的较小的地区为宜。例如图 1 中的事例参数 M_n 、 ν 和 b 值均由整个地震带内的数据统一确定。在震级分段模式中，我们将原来平均分配于全带内的高震级段中的发震可能性全部集中于带内较小的地区中，如式 (1) 中所示，故在比较小地区 A'_i 内在这一震级段 ($M_{i-1} - M_i$) 内的地震活动性增加。这相当于在图 1 (b) 中将 bc 线段提高到 ef ，将 cd 线段提高到 gh ，提高的倍数即为 A/A'_i 。由此可见，震级频度关系在区 1 内为线段 ab ，在区 2 内为 ad 和 ef ，在区 3 内为 ad ， ef 和 gh 。表 1 中列出的震级分段的年平均发生率就是与之相应的，它们反应了震级分段模式中的空间不均匀特性。

参数中影响危险性最大的，除年平均发生率外，就是震级上限。研究表明（本文集第二、三、十二篇文章），震级上限首先在空间上是与地震带内发震地质构造标志密切相关的，如发震断层的性质与规模；在时间上，不同地震活动阶段，震级上限可以相差 2 级之多。

4. 时空依赖关系的加权方法

除了前面介绍的分段泊松模式之外,还有一些有关地震活动时空不均匀性的因素应该也可能在现阶段予以考虑,如地震活动的重复性、迁移性和填充性等现有成果。为此,我们提出了发震构造的控制效应、强震重复性、大震后的减震效应、以及综合预报等因素作为加权因子的指标(本文集第四篇文章),这些加权因子是根据历史地震资料确定了一种客观的权重确定方法及数值,用以代替常用的专家主观加权法。

5. 地震活动性估计的不确定性

当前国内外专家对同一地区的地震活动性的估计,常有较大分歧,这种分歧是由于资料不充分、认识不完备引起的,它反映了人们当前认识的不确定性。在确定性方法中,对于这种情况常采用专家决策方法,对不同意见加以专家判断式的取舍综合,最后形成一个方案。这种方式是一种加权平均处理,抹杀或掩盖了不同方案的差异性和离散性,在最后结果中看不到原始方案或不同意见所反映的不确定性。由十个颇不相同的方案综合而成的一个加权平均方案与十个完全相同方案的结果对某一场点或许多场点的地震危险性估计而言,可能给出完全相同的估计,但是它们之间却存在着一种本质的差别,即前者的不确定性远大于后者,或者说,前者的可靠性远小于后者。例如十个专家医生对某一疑难病例很不相同的诊断的平均(如危险程度中等)与十位专家异口同声作出同一诊断,前者的可靠性自然不及后者。

为了揭露并反映现在我们对地震活动初性认识中的不确定性,我们分别对上述5个方案用蒙特卡罗法计算它们的地震危险性曲线,本文第十三篇文章中的图1—5给出这5个方案的50年内超过概率0.1的烈度估计,图6和7为再用上述方法求得估计的平均值 $\bar{x}$ 及标准差 σ 。最后,我们建议取

$$\bar{x} + \sigma$$

或

$$\bar{x} (1 + C_v)$$

作为考虑地震活动性估计中不确定性之后的地震危险性估计。式中变异系数 $C_v = \sigma / \bar{x}$ 。当然,我们当前认识颇不一致的地方,标准差较大,这表示地震活动性估计的不确定性较大,因而修正后的结果也增加较大,这是合理的。

五、存在问题

综合概率法是考虑地震活动时空不均匀性的地震危险性分析的概率方法,虽然我国对时空不均匀性研究较多,但与国际常用的概率分析法相结合的研究还是我们近两年提出的课题。这一年的合作研究只能算是一个开始,进一步的研究至少应包括下述课题。

1. 潜在震源区划分

(1) 潜在震源区划分依据的不确定表示

潜在震源区的划分是根据地震地质构造条件、历史大地震、近代小地震活动以及其他地球物理场的分布来确定的,所得结果现在都是用确定性的是或非(0, 1)的方式表示的,即是或不是一个潜在震源区,不能有中间状态。但是,在很多情况下,特别是在考虑到几十至几百年这样短的工程年代中,在时空不均匀性的条件下,绝大多数实际情况是:地震学家们的认识只是一种可能性,或大或小,而非绝对有把握。明显的例证就是:对于一个潜在震

源区发震可能性的判断常常是一部分专家支持一种意见，另一部分专家支持另一种意见，常出现多个方案，有时差别颇大。这种意见分歧就表明多数人的意见并不是有绝对把握的估计，而只是有些意见可能性更大一些而已。合理反映这种客观情况的方法就是采用不确定性的潜在震源区划分，容许多个方案的存在，而赋予它们不同的可靠度。这种方式虽然不同于我们习见的传统方法，但它并不是把问题搞乱了，而是更为合乎实际地把事实说清楚了。关键问题在于我们要理解不确定的意义，并对各个方案的依据进行客观的可靠度量，如用图象识别方法。

(2) 潜在震源区的边界

潜在震源区的大小与边界的确定常带有较大的任意性，从确定性方法转变到不确定的概率方法会带来一些问题。从确定性方法看，将大震级潜在震源区划得大些、多些，会使危险区扩大，结果将更为保守；但是，假若保持一个地震带的地震活动总水平不变，则扩大潜在震源区就会使危险性稀释，从而使一部分地区的危险性降低，另一部分地区的危险性提高。另外，在确定性方法中潜在震源区要有一个明确的边界，这一边界将邻近地区一分为二，一边肯定会发生地震，另一边则肯定不会。实际的估计精度当然不是这样明确，只不过是确定性方法不容许有其他表示而已。在概率方法中，就可以采用适当的概率密度函数作为过渡，在模糊数字方法中，就可以采用隶属函数过渡，用以反映区划潜在区边界的不确定性。

(3) 新区的确定

我国经验多次表明，位于中国大陆东部的板块内部地区， $M = 8$ 左右的大地震多发生在一个地震带内的“新区”，即历史上无这样大的地震记录的地区。如何确定一个新区及其未来百年内的大地震发生的概率，是当前一个难题。

2. 地震活动性参数的估计

(1) 活动性参数的估计方法

现在看来比较可行的方法是：在有足够地震历史数据的地区按数据估计，在缺乏数据的地区按地质构造条件相近的地区类比。为了考虑地震活动的时空不均匀性，我们建议用震级分段的泊松模式，而这一方法还需要改进，如在空间不均匀性上，如何处理震级分段的确定性划分及震级分段与地质构造条件关系的不确定性描述；在时间不均匀性上，如何处理活跃期与平静期的颇不明显的、或变化颇大的时段长度，不确定性方法应该在这里得到应用；另外，地震活动模式也还要进一步改进，以适应现已发现的许多特性，如特征震级与特性时间。

(2) 震级上限的概率含义

震级上限是危险性估计中的重要参数。在确定性方法中，它直接决定危险性的大小，在概率方法中，它也起重要作用。当前，重要的问题是如何区分我国地震工作者熟悉的最大可能震级和在概率法中的震级上限这两个不同的概念。前者曾应用于我国第二张地震区划图及二十年的地震预报工作中。它可以理解为在今后一段时间（如50年或100年）内很可能发生一次的最大地震震级，有人估计其概率含义约相当于50年超越概率0.1；震级上限则为震级频度关系中采用的最大极限，超越概率为零。因此，后者应比前者大。如何确定前者的概率含义及其适当应用，尚待进一步研究。

(3) 时空不均匀性的概率分析

在一个地震带内，地震活动的时间不均匀性是大家公认的，但在现行方法中却常不加考

考虑。对于地震活动期很短的地区，若短于工程结构的使用年限，在只考虑最大值的设计原则中，常取活跃期的最大值作为设防标准，这是确定法的方式；假若用概率方法，这种最大值应该与超越概率相联系。对于地震活动期很长的地区，若长于工程结构的使用年限，就需要判断结构的使用期处于地震活动的什么阶段，若位于活跃期内，活动性参数自应取活跃期的数值；若位于其他阶段，在把握不大时，为安全计，可以取整个活动期的平均值，这是当前研究尚不深入的缘故。关键在于如何根据现有的不很多的数据，用概率方法来考虑活动阶段的变动的不确定性。

（4）地震活动性估计的不确定性分析

本研究初步用蒙特卡罗法探讨了一下这个问题，所用方法有两个缺点。第一，方案太少，所得平均值及方差只是初步的。第二，所建议的不确定性的考虑方法带有主观性，需要改进。研究的重点在于综合处理随机的、模糊的和知识不完备的这三种不确定性，以及将我们习惯于用不确定性方法处理不确定事物恢复其不确定性本质。

总之，当前综合概率法的主要问题在于：一方面要认识地震危险性估计中包含的多种不确定因素，并用概率统计方法对它们作定量估计；另一方面，要进一步完善我国对地震活动时空不均匀性的认识，并明确其可靠度含义，才有可能科学地、宏观地使地震危险性估计的水平提高到一大步。

潜在震源区划分的构造成因法(华北地区)

环文林 常向东 黄玮琼

(国家地震局地球物理研究所)

一、前言

在地震危险性概率分析方法中,如何考虑地震活动的时空不均匀性是目前我国地震区划研究中急待解决的问题,我国地震区划工作者都在从各方面进行努力。作者等人在本书中提出了考虑地震空间不均匀性的潜在震源区划分;考虑时空不均匀性的潜在震源区地震活动性参数的确定;各潜在震源区地震活动时空不均匀性的加权分析方法等一整套地震危险性的概率分析方法以及依据这一整套方法提出的北京及邻区地震危险性分析的几种试验方案。本文仅是这一整套地震危险性概率分析方法的潜在震源区划分部分,其他方面将在本论文集第三、四、十二篇中讨论(见目录)。

潜在震源区划分是地震危险性概率分析方法中重要的研究课题。目前国内外对潜在震源区划分还没有确定的方法。国外潜在震源区划分往往依据地震活动的空间不确定性,而采用均匀分布的处理方法,使得潜在震源区划得较大。目前我国在地震活动、活断层研究、深部地球物理研究等方面取得了显著进展。我国地震活动具有时空不均匀性的特征已得到了广泛的承认采用国外均匀分布的处理方法划分潜在震源区,显然与我国地震活动时空非均匀特征不相符合。基于上述考虑,按新的中国地震区划图工作大纲(1986年)的要求本文提出了划分潜在震源区的构造成因方法。它既要适应地震危险性概率分析模型的要求,又要充分考虑我国地震活动的时、空不均匀性特点,并尽量利用近年来所取得的地震活动、活断层、地球物理等方面的最新研究成果。

中国地震烈度区划图(1976)完成以来,我国在地震活动的空间不均匀方面,特别是对活断层、活断层与地震活动关系方面进行了广泛的研究。其研究内容包括地震断层研究;卫星、航空遥感研究;跨断层的垂直和水平地形变测量;震源物理、现代构造应力场与形变场的研究;微震观测与研究等。通过这些研究,我国活断层的研究已由几何学研究阶段(研究断层的分布,产状等)、运动学研究阶段(研究断层的运动幅度、滑动速率、地震活动重复周期等)发展到静力学和动力学的研究阶段(研究活断层的力学机制、位错特征、破裂过程、应力场、形变场、动力来源等及其与地震活动的关系)。

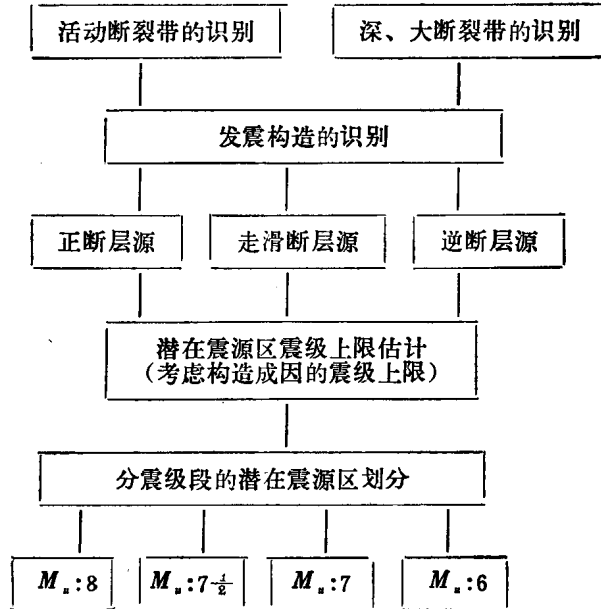
通过上述研究进一步认识到,不是所有的活动断层都能发生地震。活断层的性质不同、断层位错面的地段不同,地震强度也不同。甚至断层的结构特征和规模大小都与能否发生强震或地震强度的大小有着密切的关系。因此在编制新的地震区划图时应尽量利用这些最新成果。在地震与构造关系的研究方面已有可能深入进行包括活断层的静力学和动力学方面的研究为基础的发震构造条件的研究。

本文试图在这方面做一些尝试,从构造成因的角度,通过发震构造条件的研究,探讨潜

在震源区划分的原则和方法，并提出用这种方法划分的华北潜在震源区方案。

二、构造成因法潜在震源区划分的技术途径

构造成因法潜在震源区划分技术途径以框图表示：



在深大断裂识别方面：地震与深大断裂有着密切的关系，唐山地震、邢台地震后的深部构造研究表明，它们均发生在切穿地壳的深、大断裂带上。因此在进行潜在震源区划分时，必须进行深大断裂的识别。在这方面，前人在华北地区做了大量的工作，本文主要依据前人的结果。

在活断层识别方面：大地震是活断层继续活动的结果，这一认识已得到了普遍的承认。近年来我国对活断层进行了广泛的研究，取得了许多具有理论价值和实用价值的成果。在潜在震源区划分中将尽量利用这些成果。本文不准备详细讨论。

在发震构造识别方面：活断层力学特征的研究表明，不是所有活断层都能发生地震，只有具备特定的条件、能够孕育大地震的发震断层才能发生大地震。发震构造条件的研究已引起了地震工作者的关注。目前系统的研究还不多，为此本文将以发震构造条件的研究为重点。由于不同性质的发震断层其发震构造条件各不相同，因此将分为走滑型、正断层型和逆断层型分别考虑。

关于潜在震源区震级上限的估计：地震活动时空不均匀性的震级上限估计，受时间和空间的限制。随着时间和空间的不同，震级上限也不同。本文提出从构造成因的角度考虑地震活动空间不均匀性的震级上限估计的原则和方法。而同时考虑时空不均匀性的震级上限估计将在本论文集“时空不均匀性的地震活动参数选取的原则与方法”一文中讨论。

关于分震级段的潜在震源区划分：为了能够在概率分析方法基础上，合理反映地震活动时空不均匀性。本文采用了分震级段的潜在震源区划分方案。在潜在震源区边界确定时既要突出高震级地震空间不均匀性的特点，又要照顾较低震级强震分布不确定性的一面。

三、华北发震构造特征

判断一条活断层是否能孕育大地震，也就是说是否是发震断层，我们认为从构造成因的角度看，必须同时具备下列四个条件：

(1) 应力条件，在讨论大震的孕育问题时，首先必须涉及力源问题。如垂直应力场孕育的震源性质与水平应力场孕育的震源性质是不一样的。发震断层的取向也与应力场有密切的关系。

(2) 构造形变条件，在现代构造应力场作用下，不是所有断层都具备发震的条件，而只有在明显出现了相应性质构造形变现象的断层上才能发生地震。

(3) 断面的结构条件，只有在具有突发性释放的断面结构条件下，断层面上才能具有足够大的摩擦力使断层发生粘滑运动。

(4) 蓄能条件，具备足够大的蓄能体或震源尺度。

下面按上述四个方面对华北地区的发震构造进行讨论。

(一) 华北发震构造的应力条件

1. 华北构造应力场分布特征

许多人对华北构造应力场进行过研究^[1-4]，李钦祖等(1988)^[4]归纳了各家的结果，系统地分析了华北地区的应力场分布特征。其结果为：华北地壳处在一个一致性良好的统一应力场中，主压应力轴(P 轴)为北东东-南西西向；主张应力轴(T 轴)为北北西-南南东向、并且都接近于水平(图1)。

华北地区 $M \geq 6$ 的地震，其断层面解表现出很好的一致性，基本为走滑型，两个节面走向分别为北北东向和北西西向。

2. 构造应力场与发震断层的性质

发震断层的性质是由构造应力场决定的。震源机制研究结果表明，当构造应力场的主压应力轴(最大主应力轴)和主张应力轴(最小主应力轴)都水平时，断层以走滑运动为主；当主压应力轴垂直于地表，主张应力轴水平时断层将发生倾滑正断层的运动；当主压应力轴水平，主张应力轴垂直于地表时，断层将发生倾滑逆断层活动。因此根据各地区现代应力主轴的分布情况，就可以判断各地区现代发震断层的运动性质。当然实际情况比上述三类复杂得多，常常以某两类的过渡性质出现。为了简化，我们仍分为走滑断层、正断层、逆断层三类。对于过渡型的以其主要性质进行归并。下面列举根据我国不同作者的震源机制解统计的结果(表1)。

据鄯家全等(1979)资料^[1]统计结果表明(表1-1)，就全国来说，走滑断层的发震比例较大，占总数的52%，最大震级为 $8\frac{1}{2}$ ；逆断层占总数的44%，最大震级为 $7\frac{1}{4}$ ；正断层所占比例很小，只有4%，最大震级为6.9。

华北地区据李钦祖等(1980)资料^[3]的统计结果(表1-2)，同样以走滑断层活动为主，占总数的70%，最大震级为7.8级；其次是正断层，占总数的22.5%，震级相对较小，最大震级7.1级(唐山地震余震)。逆断层在华北地区发震比例只有7%，而且都是小于5级的地震。

由此可见，在华北地区走滑断层的活动是大地震发生的主要原因。因此构造成因法的潜

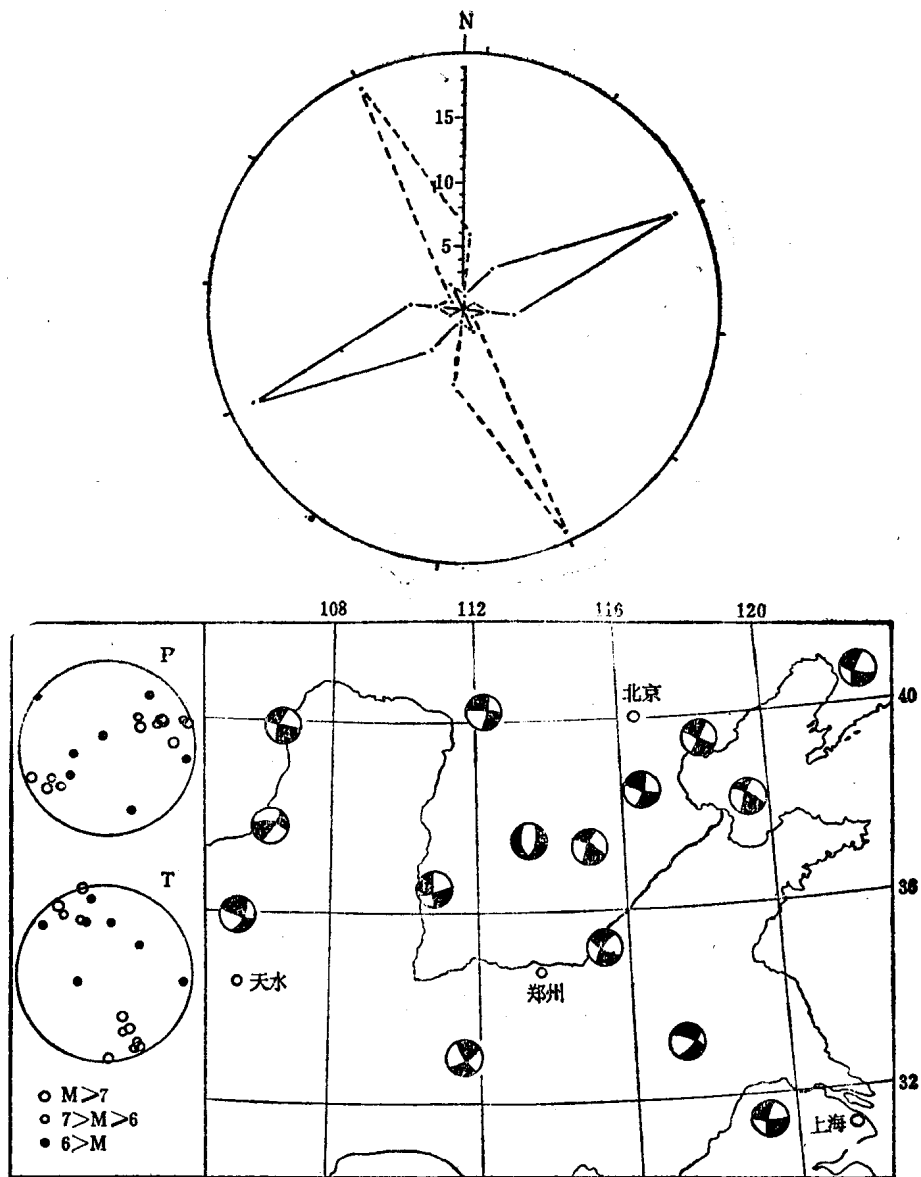


图1 华北地区地震的断层面解 (据李钦祖等, 1982[4], 加黑的象限为压缩区, 上图为P轴(实线)和T轴(虚线)的空间取向)

表1-1

中国及邻区大陆内部震源机制结果的断层性质统计

$M \geq 5$, 125次

震级范围 断层性质	$8\frac{1}{2}$	8	7.9—7.5	7.4—7.0	6.9—6.0	5.9—5.0	M_{max}	各级总数	%
走滑断层	1		6	9	31	19	$8\frac{1}{2}$	66次	53%
逆断层				4	31	18	$7\frac{1}{4}$	53次	43%
正断层					4	1	6.9	5	4%

表1-2

华北地区震源机制结果的断层性质统计

 $M \geq 4.0$, 44次

震级范围 断层性质	8	7.9—7.5	7.4—7.0	6.9—6.0	5.9—5.0	4.9—4.0	$M_{\max}$	各级总数	%
走滑断层		1	4	10	10	6	7.8	31	70.5%
逆断层						3	4.5	3	7%
正断层			1*		2	7	7.1	10	22.5%

• 1976年唐山地震的最大余震7.1级, 为正走滑断层

在震源区划分应把走滑型发震断层的研究放在首位。

3. 断层面解与发震断层的取向

在一定的应力场条件下, 发震断层的走向往往是确定的。据震源机制研究, 如果一个地区应力条件和构造条件相同, 区内各次地震的断层面解的两个节面大致是相近的。据李钦祖的研究〔4〕, 华北地震断层面解节面的优势走向是北北东、北西西向和少量的北东-北东东向(图2)。据我们的研究, 华北6级以上强震, 绝大多数发生在上述三个走向的活动断层上(表2)。

可见, 根据断层面解节面走向的优势结果就可大致决定发震断层的走向, 其他方向的断层可不列为发震断层。

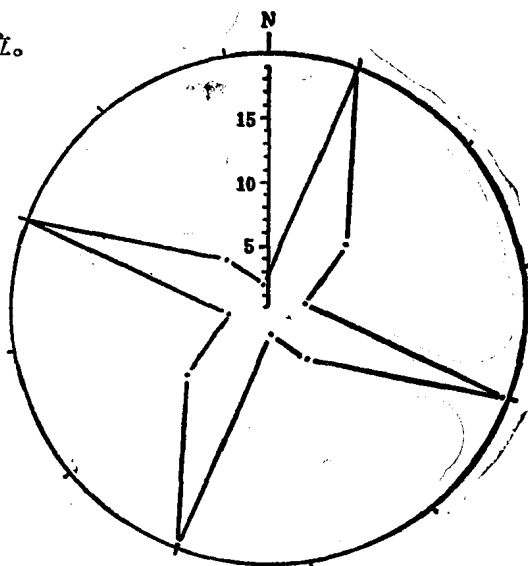


图2 华北地震断层面解两个节面的优势分布(据李钦祖等, 1982〔4〕)

表2

华北6级以上历史强震发震断层走向统计表

震级范围 次数和百分比 断层类型	8 $\frac{1}{2}$ —8		7.9—7.5		7.4—7.0		6.9—6.0	
	次数	%	次数	%	次数	%	次数	%
NNE-SWW	5	100%	5	71.4%	6	60%	33	53%
NWW-SEE			1	14.3%	2	20%	5	8%
NEE-SWW					2	20%	18	29%
不清			1	14.3%			6	10%
各级地震总数	5		7		10		62	

(二) 华北发震构造的构造形变特征

1. 理论计算结果的借鉴